降雨过程中土壤物理结皮入渗情况及当量孔径的变化研究

刘冠亨[1]，吴冠宇[2]，李建德[3]，王 健[1]，杨琴侠[4]，薛 冬[4]

（1. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院，陕西 杨凌 712100；2. 陕西省水利水电工程咨询中心，陕西 西安 710000；3. 黄河勘测规划设计研究院有限公司，河南 郑州 450000；4. 韩城市水土保持工作站，陕西 韩城 714000）

摘　要：土壤物理结皮的孔径的大小直接影响土壤水分下渗和气体交换。因此，本研究通过人工模拟降雨，选择塿土为研究对象，采用微型盘式入渗仪进行入渗试验，研究土壤物理结皮在不同降雨强度下的入渗情况以及孔径变化情况。结果表明：(1) 在−0.5 cm压力水头下，结构结皮的吸渗率随着降雨历时先减小，在20 min时增大，沉积结皮的吸渗率随着降雨历时的延长一直减小；(2) 两类结皮随着降雨过程的进行，大孔隙（孔径>0.5 mm）占比开始减小，中等孔隙（孔径介于0.3~0.5 mm）占比增加，结构结皮在20 min时小孔隙（孔径<0.3 mm）占比有所减小，沉积结皮中等孔隙的占比在10 min后保持不变；(3) 两类结皮的平均孔径均随降雨历时的延长而减小。负压水头增大过程中，土壤结皮有效吸渗能力减小，当土壤结皮发育完全后，吸渗率趋于稳定。

关键词：土壤物理结皮；土壤当量孔径；人工模拟降雨；微型盘式入渗仪；吸渗率

坡面侵蚀是土壤侵蚀的主要类型之一。相关研究表明，影响坡面土壤侵蚀产沙的因素较多，主要有降雨、坡面地形、坡面径流、植被、整地方式、土壤性质等[1]。降雨是坡面侵蚀最根本的动力来源，随着降雨强度的增大，坡面径流量和侵蚀量均增加。地形对于坡面侵蚀的影响主要表现在坡度和坡长两个方面，坡度对坡面侵蚀的演变发展过程和侵蚀强度起着重要作用[2]。在黄土高原地区，由降雨产生的土壤物理结皮易诱发水力侵蚀的发生[3]。吴发启等[4]研究发现，坡耕地土壤结皮是在降雨、径流以及它们与地表坡度等因素的共同作用下形成的。

土壤物理结皮是降雨过后土壤表层普遍存在的现象，它是指表面土壤团聚体在理化作用下破碎形成的致密结构表层，其容重大、孔隙度较小、导水率差[5]。土壤物理结皮可分为两类：结构结皮和沉积结皮。结构结皮是由于雨滴对稳定土壤结构表面不断打击压实，在雨滴打击分散土粒进行土壤颗粒的重组后形成，沉积结皮是通过水分下渗淋滤细颗粒并且颗粒不断沉积形成[6]。

两类物理结皮在颗粒组成、粗糙度、入渗特性等方面均有差异。吴秋菊等[7]通过人工模拟降雨试验，研究不同耕作措施下土壤结皮的形成特征，沉积结皮相对于结构结皮密度高且孔隙度低，沉积结皮的平均减渗效益为37.13%，结构结皮的平均减渗效益为19.79%，沉积结皮能够更大程度影响坡面土壤水分入渗；杨昌等[8]通过室外人工模拟降雨试验，发现不同类型结皮土壤物理性质差异显著，沉积结皮体积质量及黏粒质量分数均大于结构结皮，砂砾质量分数则表现为结构结皮高于沉积结皮。

土壤孔隙是土壤容纳空气和水分的空间，也是植物根系伸展、土壤动物及土壤微生物生长发育及活动的场所，直接影响着土壤肥力和土壤水分的有效性[9]。土壤孔隙直接影响土壤的透水性能，而土壤的透水性能又是影响土壤水力侵蚀的一个主要原因[10]。土壤孔隙度直接影响着土壤侵蚀的强弱。单奇华等[11]分析得到，南京城市林业土壤可蚀性与土壤孔隙度关系密切。针对黄土丘陵区研究

收稿日期：2023-03-01；　**修订日期**：2023-06-04
基金项目：科技兴蒙行动重点专项(2022EEDSKXM005-01)；国家自然科学基金项目(42377332)
作者简介：刘冠亨（2001-），男，硕士研究生，主要从事土壤侵蚀方面的研究. E-mail: lgh18291278923@163.com
通讯作者：王健. E-mail: Wangjian@nwauaf.edu.cn

结果表明,土壤孔隙度越小土壤侵蚀模数越大[12]。

然而针对土壤物理结皮在降雨过程中孔隙分布差异研究迄今尚少,基于此,本文以塿土为研究对象,通过人工模拟降雨,模拟不同类型结皮的发育,通过负压入渗试验,系统确定结皮当量孔径,以期达到直观反映土壤物理结皮孔径在降雨过程中的变化情况,最终服务于黄土高原坡耕地田间管理工作。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

研究区位于陕西杨凌(107°59′~108°09′E,34°14′~34°24′N),海拔418.0~540.1 m,地势北高南低,气候类型属暖温带半湿润气候区,四季分明,年平均气温12.9 ℃,极端最高气温42 ℃,最低气温−19.4 ℃,全年无霜期221 d。年均降水量637.6 mm,多集中在7—10月,占多年平均降水量的60%,年平均蒸发量884 mm。试验土壤为杨凌塿土表层耕作土,采样深度0~20 cm。土壤的基本理化性质见表1。

1.2　研究方法

试验装置为坡度可调式铁槽(2 m×1 m×0.50 m),槽底打孔,试验设置坡度为3°,槽内填土深度30 cm,为模拟黄土高原地区土地特性,土壤容重设计为1.3 g·cm^{-3}。土壤填充过程中,为保证土层之间良好接触,采用分层填装法,以5 cm高度为一层,共计6层。为模拟黄土高原高低起伏的微地形,分别通过掏挖和填装形成地势相对高的部位(垄)和地势相对低的坑洼(沟),二者高差为10 cm。垄部降雨后形成结构结皮,沟部降雨后形成沉积结皮。

室内人工模拟降雨,装置采用摆动下喷式喷头模拟自然降雨,安装高度7 m,有效降雨面积约为3 m×6 m,降雨均匀度达90%以上,可通过进水口处的压力表与单喷头、多喷头叠加等方法调节雨强,可调雨强范围30~120 mm·h^{-1}。本试验设计雨强采用60 mm·h^{-1}[13],降雨历时设计为0、5、10、15、20、30 min。共计5场降雨。降雨后,垄部土壤表层承受雨滴打击、土壤结构重组等作用形成结构结皮;沟部土壤表层除了经历前期的降雨打击作用外,还有后期携沙径流的汇集,最终积水下渗和蒸发,泥沙颗粒沉降形成沉积结皮。

降雨结束后将不同降雨历时下的结皮采样,土样在105 ℃下烘干,用毛刷刷去结皮底部土壤颗粒,采用游标卡尺测量结皮厚度,重复5次,采用涂膜法[14]测定结皮容重,容重的计算公式如下:

$$r_d = M_1 \cdot \rho_w / \left(M_3 - M_2 \right) \tag{1}$$

式中:r_d为结皮容重(g·cm^{-3});M_1为干土重(g);ρ_w为水的密度(g·cm^{-3});M_2,M_3分别为放入土块前、后天平的读数(g)。

降雨结束将土样放置通风处阴干,每隔30 min采用数显式推拉力计测定不同结皮的强度,每个土样重复测定5次,同时取锥体破坏部位周围的土壤通过烘干法测含水量。根据卜崇峰等[14]在研究黄土表层抗剪强度随降雨历时变化时采用20%含水量对应的强度值,故本研究采用20%含水量下的强度来描述不同降雨历时的结皮强度。将同一降雨历时下的5组结皮强度和含水量数据进行拟合,通过回归曲线得到20%含水量对应的结皮强度。

降雨结束将阴干的土样,采用土壤温湿度水分传感器实时监测结皮含水率,待土样达到设计含水量10%后开始入渗试验。选取去离子水为入渗水源,水温25 ℃。

采用改进的微型盘式入渗仪(储水室容量由95 mL扩增到425 mL)进行负压入渗试验[13],测定前在所选区域土表垫一层石英砂使渗透计底部不锈钢多孔盘与土壤充分接触。试验设置6个负压梯度(−0.5、−1、−2、−3、−4、−5 cm),每个梯度各设置5个重复。入渗时间10 min,每隔30 s记录1次读数。吸渗率的计算公式如下:

$$s = \frac{I}{\sqrt{t}} \tag{2}$$

式中:I为一定负压水头下的累积入渗量(cm);t为吸渗时间(s);s为一定负压水头下的吸渗率(cm·s$^{-0.5}$)。根据付秋萍等[15]的研究结果,取前30 s入渗数据计

表1　试验土壤理化性质

Tab. 1　Physical and chemical properties of experimental soil

土壤类型	土壤质地	碳酸钙含量/(g·kg^{-1})	有机质含量/(g·kg^{-1})	pH值	容重/(g·cm^{-3})	颗粒组成/%			
						<0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~0.2 mm	0.2~2.0 mm
塿土	粉砂壤土	84.8	8.53~22.7	8.29~8.40	1.30	10.32	57.93	30.18	1.57

算吸渗率。

根据毛管水理论，土壤水分吸力与当量环境之间存在以下关系：

$$H = \frac{2\delta}{\rho_w g R} \tag{3}$$

式中：H为土壤吸力(m)；R为当量孔径(m)；δ为水表面张力系数，当温度为20 ℃时值为72.5×10^{-3} $N\cdot m^{-1}$；ρ_w为水的密度($kg\cdot m^{-3}$)；g为重力加速度($N\cdot kg^{-1}$)。

在常温20 ℃时，-0.5、-3、-5 cm水头下的吸渗力将分别排除当量孔径＞3、0.5、0.3 mm孔隙中的水流。将孔径＞0.5 mm的孔隙定义为大孔隙，0.3~0.5 mm的孔隙定义为中等孔隙，孔径＜0.3 mm的孔隙定义为小孔隙。为进一步解释土壤吸渗特性在降雨过程中的变化规律，将大孔隙、中等孔隙和小孔隙的孔径范围求取中间值，即平均当量直径，该值乘以不同等级孔隙的分布权重，得到不同降雨历时下的结皮孔隙平均当量直径。

1.3 数据处理

利用Microsoft Excel 2016进行数据处理与绘图，利用IBM Statistics SPSS 25软件进行回归分析、独立样本T检验、相关性分析。

2 结果与分析

2.1 土壤物理结皮吸渗率

土壤吸渗率是土壤依靠毛细管吸收水分能力的一种量度，根据结皮吸渗试验，计算出土壤结皮吸渗率见表2。结皮吸渗率在负压水头及降雨历时影响下，变化较为显著。对比两类结皮吸渗率发现，结构结皮吸渗率始终大于沉积结皮，均表现为随负压的减小，吸渗率逐渐减小的特征。随负压水头的增大，土壤吸持水分阻力变大，有效吸渗能力随之减小。在降雨历时较短(5 min)，负压较高(-0.5 cm)的情况下，结构结皮及沉积结皮均表现为高吸渗性，分别为26.84 $cm\cdot s^{-0.5}$和20.69 $cm\cdot s^{-0.5}$。后随降雨历时的延长，以及负压变化，两者吸渗率减小为4.45 $cm\cdot s^{-0.5}$和3.30 $cm\cdot s^{-0.5}$。结构结皮在-0.5 cm压力水头下的吸渗率随降雨历时延长而减小，但在20 min时增大，考虑到结皮在15~20 min处于破坏重组阶段，因此吸渗能力有所提升，随降雨持续，结皮进一步紧密并稳定，土壤吸渗能力维持到恒定值。而沉积结皮始终表现为吸渗率随降雨历时延长而减小。

2.2 土壤物理结皮孔径特征

2.2.1 土壤物理结皮孔径分布特征 随着降雨过程的进行，土壤在雨滴打击作用下原有孔径结构被破坏，发生重组并形成结皮，结皮的当量孔径大小随着降雨的延长发生变化，土壤结皮当量孔径随降雨历时的变化见图1。两类结皮孔隙分布随降雨历时的延长变化较为显著。对于装填土壤(降雨历时为0 min)时，土壤中大孔隙的占比最高，为86.36%，小孔隙占比最低，为4.55%，中等孔隙的占比为9.09%。随着降雨过程进行，结皮中大孔隙占比开始减小，小孔隙的占比开始增加，中等孔隙的占比呈先增加后保持不变的趋势。两类结皮均在降雨历时为30 min时大孔隙占比达到最低，小孔隙占比达到最高。对比两类结皮的孔隙占比变化，可以得出，结构结皮在降雨历时20 min时，中等孔隙的占比达到最大，为32.40%，而在降雨历时30 min时，中等孔隙占比出现下降，为43.54%；沉积结皮中等孔隙占比随着降雨历时的延长开始增加，降雨历时10 min时，中等孔隙占比为25.63%，之后开始趋于稳定。

2.2.2 土壤物理结皮平均当量孔径 土壤物理结皮平均当量孔径可以直观地反映结皮孔径变化的整体趋势，对不同降雨历时下当量孔径分布比例进行

表2 不同负压水头、不同降雨历时下土壤吸渗率

Tab. 2 Soil infiltration rates under different negative pressure heads and different rainfall duration

降雨历时	结构结皮						沉积结皮					
	-0.5 cm	-1 cm	-2 cm	-3 cm	-4 cm	-5 cm	-0.5 cm	-1 cm	-2 cm	-3 cm	-4 cm	-5 cm
0 min	52.49	19.09	14.32	7.16	7.16	2.39	52.49	19.09	14.32	7.16	7.16	2.39
5 min	26.84	17.43	12.09	6.85	3.37	3.25	20.69	16.03	5.96	5.48	0.00	1.85
10 min	25.97	16.87	16.87	10.02	8.44	4.32	17.66	13.96	5.90	7.26	2.73	0.00
15 min	17.43	12.93	12.93	8.75	6.36	4.72	10.80	10.12	5.06	5.31	2.49	0.00
20 min	23.53	20.25	16.31	13.14	11.81	5.51	9.59	7.59	5.90	5.62	3.22	0.00
30 min	14.95	13.50	11.76	8.44	8.44	4.45	9.75	10.54	6.07	5.80	3.04	3.30

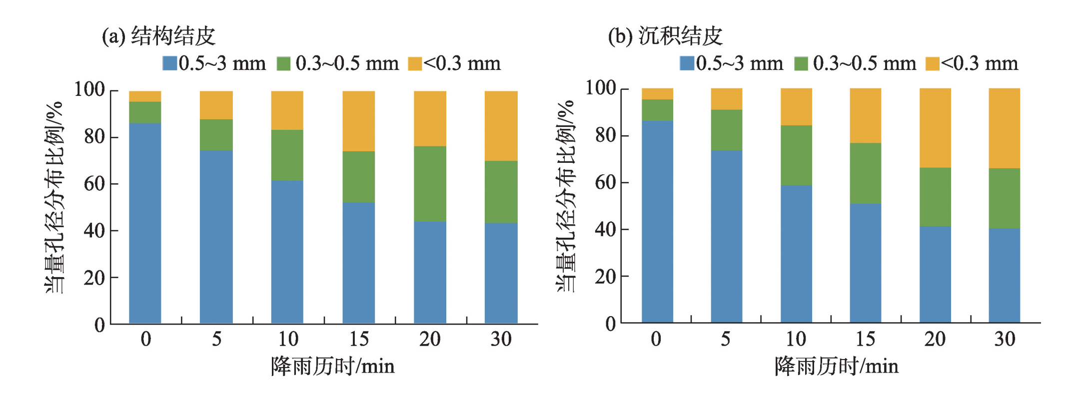


图1 不同降雨历时下结皮当量孔径占比分布

Fig. 1 Distribution of equivalent pore size ratio of crust under different rainfall durations

加权计算,图2为土壤物理结皮平均当量孔径随降雨历时变化的特征。两类结皮的平均孔径均随降雨历时的延长而减小,以未经历降雨的土壤平均孔径作对照,结构结皮的减小幅度依次为:11.54%、23.61%、33.08%、39.66%、41.25%,沉积结皮的平均孔径随降雨历时延长的减小幅度依次为:11.87%、25.61%、33.86%、43.75%、44.48%。结构结皮的平均当量孔径大于沉积结皮,且随降雨历时的延长,该差异逐渐显著,从降雨历时5 min下0 mm差异化为30 min下的0.05 mm。

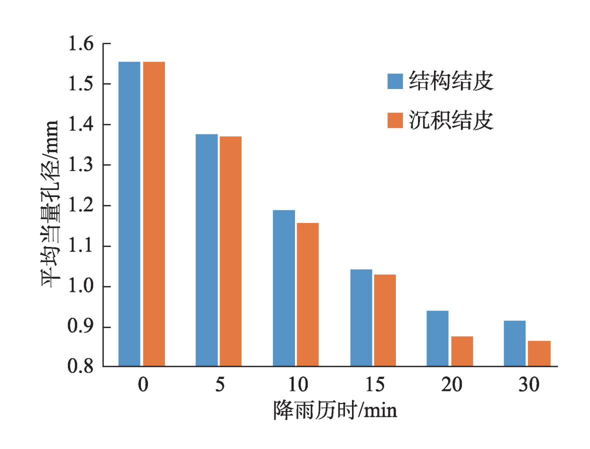


图2 不同降雨历时下结皮孔隙平均当量孔径

Fig. 2 Average equivalent diameter of crust pores under different rainfall durations

2.3 土壤物理结皮当量孔径影响因素分析

结皮作为一种特殊的地表致密层,其性质的改变本质上是大小颗粒的排列重组,因而颗粒之间的孔隙结构随之改变,图3为结皮的强度、厚度、容重与孔隙平均当量直径关系,可以看出,结皮平均孔径与3类指标均为负相关关系,通过拟合得到平均孔径与3类指标的线性关系,拟合度在0.85以上。结皮强度取决于土壤黏聚力和内摩擦角,当平均孔径减小时,表明土壤颗粒之间衔接变得紧密,颗粒之间的接触面变多,从而增大了颗粒之间的黏结性和内摩擦角,因而强度随平均孔径的减小而增大。容重即是单位体积土体的干质量,对于一定体积的结皮,当结皮平均孔径减小时,结皮的孔隙体积减小,颗粒体积增大,结皮干质量增大,因此结皮容重随平均孔径的减小而增大;结皮厚度表示雨滴打击、颗粒淋移以及沉降等作用的深度,结皮平均孔径则表示上述作用的程度,厚度从结皮整体的角度表明结皮的下界限,平均孔径从结皮内部组成的角度表明土壤颗粒抵抗外界压力的程度,两类指标处于同步变化,从不同角度描述结皮的发育情况。

3 讨论

坡耕地是黄土高原地区最主要的土地利用类型,也是黄土高原侵蚀最严重的区域[16]。降雨是坡耕地最根本的动力来源,降雨会直接导致土壤结皮的形成,结皮的吸渗率对于土壤侵蚀程度有着直接影响,采用人工模拟降雨法,测定分析相同降雨强度下5个不同降雨历时下的结皮基本性质,选用微型盘式入渗仪测定结皮入渗指标。本研究结果表明,结构结皮在-0.5 cm压力水头下的吸渗率随降雨历时的延长而减小,在20 min时增大,随着降雨的持续,土壤吸渗能力达到恒定值;沉积结皮的吸渗率随降雨历时的延长而减小。

结皮的存在会影响水分下渗的速率[17]。结皮入渗过程大致分为3个阶段:初期土壤初始入渗速率较大,随着入渗过程进行入渗速率减小,最终达到稳定阶段。本研究发现:两类结皮的吸渗率均随

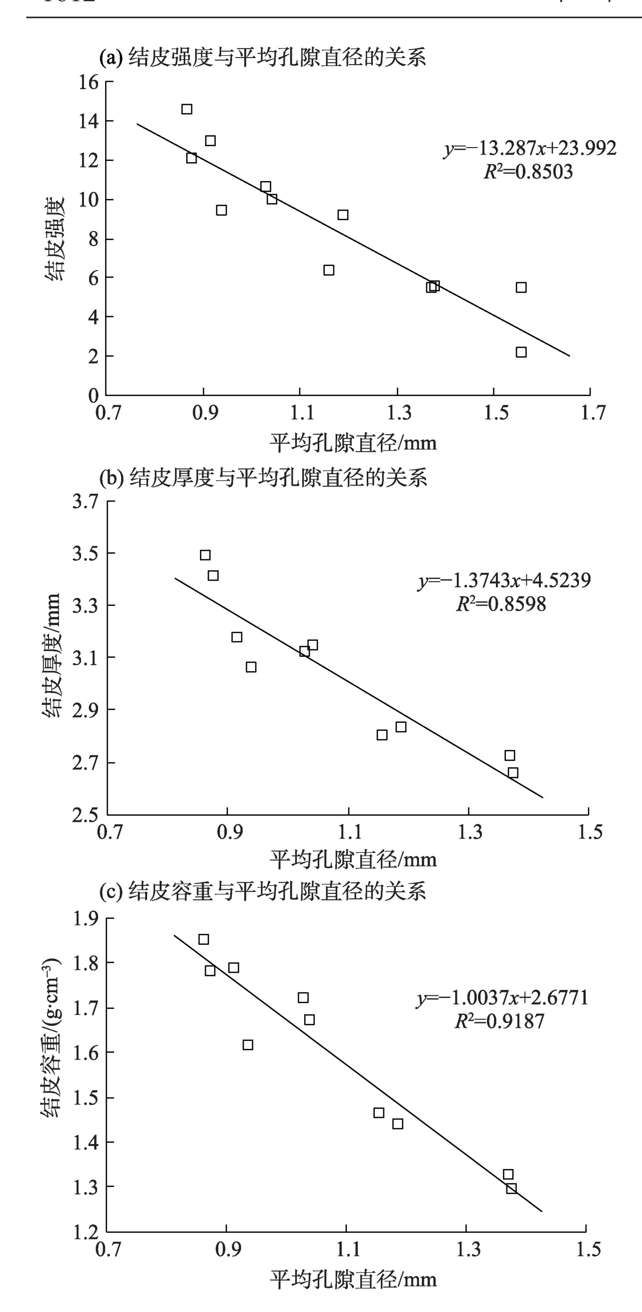


图3 结皮基本性质与平均孔隙当量孔径的关系

Fig. 3 The relationship between the basic properties of the crust and the average pore equivalent pore size

着负压的减小而减小，对比两类结皮，发现结构结皮的吸渗率始终大于沉积结皮，结构结皮在20 min时吸渗率增大，之后继续减小最终维持恒定，这是因为结构结皮在15~20 min时处于破坏重组阶段[6]，吸渗率提升，随着降雨的延长，结皮进一步发育，最终发育完全，吸渗率维持稳定。沉积结皮的吸渗率随降雨历时延长而减小，表明沉积结皮在降雨过程中一直处于持续发育阶段，土壤表层吸渗率不断减小，结构不断致密，最终结皮发育完全。

土壤孔隙是土壤容纳空气和水分的空间[18]，也是植物根系伸展、土壤动物及土壤微生物生长发育及活动的场所，直接影响着土壤的肥力和土壤水分的有效性[9]。同时，土壤孔隙的分布也对土壤呼吸有着一定的影响[19]。本研究发现，随着降雨过程的进行，结构结皮与沉积结皮大孔隙占比均开始减小，小孔隙占比开始增加，中等孔隙占比总体表现为先增加后趋于稳定，两类结皮的平均孔径均表现为随着降雨历时的延迟而减小。这是因为结皮的形成可分为3个阶段[20]，即不完整结皮阶段(降雨历时 5 min)、结皮逐渐形成阶段(降雨历时 15~20 min)、表土结皮基本形成且处于“破坏–形成”的动态平衡阶段，在降雨开始初期，土壤中部分大孔隙受到雨滴击溅作用，变为中等孔隙或小孔隙，导致大孔隙占比开始减小，随着降雨的进行，雨滴不断打击，小孔隙的占比增加，而在结皮形成后(降雨历时30 min)，3类孔径占比均趋于稳定。由于降雨过程中雨滴持续打击土壤，因此，土壤平均孔径在降雨过程中一直表现为下降趋势。

本研究采用土壤为杨凌塿土，因此，研究结果能否用于其他土壤类型还有待验证。此外，本研究设计的雨强为60 mm·h^{-1}，当降雨条件发生改变时，土壤物理结皮当量孔径的分布情况也有待进一步研究。但本研究统一土壤类型、土壤容重、雨强等指标，直观得出了土壤物理结皮孔径在降雨过程中的变化情况，并基于结皮孔径范围的划分，通过结皮当量孔径更加直观地反映出随着降雨历时的延长结皮孔径的变化情况，对于黄土高原坡耕地土壤侵蚀预测和水土保持措施布设仍具有积极的指导意义。

4 结 论

负压水头增大的过程中，土壤吸持水分的阻力变大，有效吸渗能力减小。结构结皮在−0.5 cm压力水头下的吸渗率随降雨历时的延长而减小，在20 min时增大，随着降雨的持续，结皮进一步紧密并稳定，土壤吸渗能力达到恒定值；沉积结皮的吸渗率随降雨历时的延长而减小，表明沉积结皮在降雨过程中一直处于持续发育阶段，土壤表层吸渗率不断减小，结构不断致密，最终结皮发育完全。结构结皮在未经历降雨时土壤表层以大孔隙为主，结构较为疏松，随着降雨过程进行，大孔隙占比开始减小，在20 min时，小孔隙数量有所减小，中等孔隙数量

增多;沉积结皮随着降雨过程的进行,小孔隙数量不断增加,中等孔隙数量在10 min降雨后保持不变,大孔隙数量不断减小。两类结皮的平均孔径均随降雨历时的延长而减小。

参考文献(References):

[1] 许海超, 李子君, 林锦阔, 等. 燕山土石山区降雨和下垫面条件对坡面侵蚀产沙的影响[J]. 山地学报, 2016, 34(1): 46-53. [Xu Haichao, Li Zijun, Lin Jinkuo, et al. Influences of rainfall and underlying surface conditions on soil erosion and sediment yield in Yanshan rocky mountain area[J]. Mountain Research, 2016, 34(1): 46-53.]

[2] 李桂芳, 郑粉莉, 卢嘉, 等. 降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 147-154, 182. [Li Guifang, Zheng Fenli, Lu Jia, et al. Effects of rainfall and topography on soil erosion processes of black soil hillslope[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 147-154, 182.]

[3] 陈琳, 王健, 霍春平, 等. 坡耕地土壤物理结皮分层颗粒组成特征研究[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 985-992. [Chen Lin, Wang Jian, Huo Chunping, et al. Study on particle distribution characteristics of soil physical crust profile in sloping farmland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(4): 985-992.]

[4] 吴发启, 范文波. 坡耕地土壤结皮形成的影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 33-36. [Wu Faqi, Fan Wenbo. Analysis on factors affecting soil crust formation on slope farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(1): 33-36.]

[5] 路培. 土壤结皮形成机制及空间分布对侵蚀的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018. [Lu Pei. Formation of Soil Crust and its Effects of Different Spatial Distributions of Physical Soil Crusts on Runoff and Erosion[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.]

[6] 李浩宏, 王占礼, 申楠, 等. 土壤结皮研究进展[J]. 人民黄河, 2015, 37(10): 92-98. [Li Haohong, Wang Zhanli, Shen Nan, et al. Research progress of soil crust[J]. Yellow River, 2015, 37(10): 92-98.]

[7] 吴秋菊, 吴佳, 王林华, 等. 黄土区坡耕地土壤结皮对入渗的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(2): 303-311. [Wu Qiuju, Wu Jia, Wang Linhua, et al. Effects of soil crusts on infiltration in slope land in the loess area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(2): 303-311.]

[8] 杨昌, 王健, 李建德, 等. 土壤表层结皮失水裂缝形态发育规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(10): 103-108, 124. [Yang Chang, Wang Jian, Li Jiande, et al. Formation of crusts and initiation and development of cracks in them following soil wetting and drying[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(10): 103-108, 124.]

[9] 李志熙, 白岗栓, 邹超煜, 等. 自然生草对渭北旱塬苹果园土壤孔隙和水分入渗的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(5): 146-156. [Li Zhixi, Bai Gangshuan, Zou Chaoyu, et al. Effects of self-sown grass on soil porosity and soil infiltration in apple orchard in Weibei dry plateau[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(5): 146-156.]

[10] 夏青, 何丙辉. 土壤物理特性对水力侵蚀的影响[J]. 水土保持应用技术, 2006(5): 12-15. [Xia Qing, He Binghui. Effect of soil physical properties on water erosion[J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2006(5): 12-15.]

[11] 单奇华, 李卫正, 俞元春, 等. 南京城市林业土壤可蚀性及影响因素[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, 32(2): 47-50. [Shan Qihua, Li Weizheng, Yu Yuanchun, et al. Erodibility of urban forest soil in nanjing[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2008, 32(2): 47-50.]

[12] 丁绍兰, 王振, 赵串串, 等. 青海黄土丘陵区沟蚀侵蚀模数与其影响因子关系分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 60-65. [Ding Shaolan, Wang Zhen, Zhao Chuanchuan, et al. The relationship between the erosion modulus and the influence factors in the loess hilly and gully area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(6): 60-65.]

[13] 李建德, 王健, 徐飞飞, 等. 不同负压设置对微型盘式入渗仪测定结皮入渗性能的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(7): 78-85. [Li Jiande, Wang Jian, Xu Feifei, et al. Effect of suction in the infiltrometer on water infiltration into crusted soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(7): 78-85.]

[14] 卜崇峰, 石长春, 蔡强国. 土壤结皮几种分析测算指标的应用评价[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 240-243. [Bu Chongfeng, Shi Changchun, Cai Qiangguo. Evaluation on calculation on index for soil crust development[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(2): 240-243.]

[15] 付秋萍, 王全九, 樊军. Philip公式确定吸渗率时间尺度研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 65-70. [Fu Qiuping, Wang Quanjiu, Fan Jun. Study on the time scales of soil sorptivety determined by Philip equation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(4): 65-70.]

[16] 马金龙, 许欢欢, 王兵, 等. 黄土高原坡耕地土壤物理结皮对坡面产流产沙过程的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 45-49. [Ma Jinlong, Xu Huanhuan, Wang Bing, et al. Effect of soil physical crust on runoff and sediment yield on sloping farmland of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 45-49.]

[17] 付广军, 廖超英, 孙长忠. 毛乌素沙地土壤结皮对水分运动的影响[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(1): 7-10. [Fu Guangjun, Liao Chaoying, Sun Changzhong. The Effects of soil crust to water movement in Maowusu Sand Land[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(1): 7-10.]

[18] 王荣女. 毛乌素沙地不同类型生物土壤结皮-土壤呼吸的季节变化特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 961-972. [Wang Rongnv. Seasonal variation characteristics of different types of biological soil crust-soil system respiration in Mu Us Sandy Land[J]. Aird

Zone Research, 2021, 38(4): 961–972.]

[19] 许志平, 邵天杰, 张连凯, 等. 黄土区不同土地利用类型下砂质壤土地表CO_2通量变化特征——以清凉寺沟流域为例[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1000–1009. [Xu Zhiping, Shao Tianjie, Zhang Liankai, et al. Study on the change of surface CO_2 flux in sandy loamy soil under different land use types: An example from the Qingliangsi ditch watershed[J]. Aird Zone Research, 2021, 38(4): 1000–1009.]

[20] 蔡强国. 流域产沙模型概述[J]. 中国水土保持, 1990(6): 16–20, 64–65. [Cai Qiangguo. Review on the modelling of sediment yield from watershed[J]. Soil and Water Conservation in China, 1990(6): 16–20, 64–65.]

Equivalent pore size characteristics in the soil physical crust

LIU Guanheng[1], WU Guanyu[2], LI Jiande[3], WANG Jian[1], YANG Qinxia[4], XUE Dong[4]

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Shanxi Water Conservancy & Electricity Engineering Consultant Center , Xi'an 710000, Shaanxi, China; 3. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Henan 450000, Zhengzhou, China; 4. Hancheng District Soil and Water Conservation Workstation, Hancheng 714000, Shaanxi, China)

Abstract: Pore size in the soil physical crust directly affects soil water infiltration and gas exchange. However, few studies have investigated the changes in pore size within the soil physical crust during rainfall events. This study has utilized Lou soil as the research object and artificial rainfall simulations, with microdisk infiltration apparatus to study the infiltration of the soil physical crust under different rainfall intensities and the pore size changes. The results show that under the pressure head of −0.5 cm, the infiltration rate of the structural crust decreases with the rainfall duration and then increases after 20 min. As rainfall progresses, the proportion of large pores in the two types of crusts begins to decrease, and the proportion of medium pores increases. The proportion of small pores in the structural crust decreases at 20 min, and the proportion of medium pores in the sedimentary crust remains unchanged at 10 min. The average pore size for the two types of crusts was found to decrease with the extension of the rainfall duration. During the increase in the negative pressure head, the effective infiltration capacity of the soil crust decreased. When the soil crust developed completely, the infiltration rate tended to be stable.

Keywords: soil physical crust; equivalent diameter of soil pore; artificial simulated rainfall; micro-disc infiltration instrument; permeability